第16卷 第2期 电子科学学刊 Vol. 16. No. 2
1994年3月 JOURNAL OF ELECTRONICS Mar. 1994

有源多线圈耦合网络网孔方程的直接建立算法

雷 海 亮
(山东工业大学电力系 济南 250014)

摘要 本文在提出了用回路描述电路元件的拓扑结构以后，给出了具有受控源和多线圈耦合的平面网络网孔方程的直接建立算法. 网络方程的个数等于网络的网孔数. 本文方法得到的网络方程在此类网络中比改进节点法方程数少，与一般节点法相比，方程建立的过程简单明了，只需对各元件的拓扑结构和参数进行检索即可.

关键词 有源网络，互感电路，回路分析，直接算法

1 前言

在有源耦合电感网络的计算机辅助分析中，目前多采用节点法或改进节点法[1,2]. 在线圈成对耦合时，计算机可直接建立节点方程，在具有受控源和多线圈耦合时，直接列写方程的方法至今未见文献报道. 文献[3]提出了多线圈耦合时回路方程的建立方法，该方法选回路电流为待求量，较好地解决了互感网络，即具有电流控制元件网络的方程建立问题. 但是，仍需要选树和对网络的拓扑结构、参数子矩阵进行矩阵运算，而不能直接建立网络方程. 本文在文献[3]的基础上提出了直接建立平面有源互感网络网孔方程的算法.

2 网络的处理

为了直接建立网络的网孔方程，进行如下处理：所有电流源（独立的和受控的）都转化为电压源. 理想电流源和仅有电容、电感并联的电流源皆用一个不影响网络分析精度的电阻与其并联，然后再转化为电压源.

3 拓扑结构和参数的安排

网络元件的拓扑信息和参数分类放在4个数组内，即TOPLOG1，TOPLOG2，TOPLOG3，TOPLOG4. 元件类型规定为：1代表电阻，2代表电容，3代表非耦合线圈的自感系数，4代表耦合线圈的自感系数，5代表电压控制电压源，6代表电流控制电压源. 各元件的拓扑性质用所在网孔表示. 在平面电路中，每个元件都处在两个内网孔上或处在一个内网孔和外网孔上. 若网孔的绕向都选为顺时针或逆时针，则每个元件所在支路的参考方向必与一网孔的绕向相同（同回路），与另一网孔的绕向相反（反回路）.

TOPLOG 1 为 RLC 各元件的信息，具体情况是:

1992-10-09 收到，1993-03-22 定稿

雷海亮 男，1946年生，副教授，现从事理论电工专业的教学和研究工作.

元件序号 同回路 反回路 参数 类型

⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮

TOPLOG 2 为受控源的信息,具体情况是:

控制元件序号 同回路 反回路 控制系数 类型

⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮

TOPLOG 3 为耦合线圈的信息,具体情况是:

序号 支路号 耦合支路数 耦合元件号 互感系数

⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮

TOPLOG 4 为独立电压源的信息,具体情况是:

元件序号 同回路 反回路 参数 1 参数 2

⋮ ⋮ ⋮ ⋮ ⋮

上面数组的建立还有下面 4 点需要说明: (1)若元件处在外网孔上,以“0”表示,处在内网孔上,以该网孔的编号表示. (2)受控源只受无源元件的电压、电流控制. (3)互感系数可正可负. 当两耦合线圈的参考方向都是从同名端指向另一端时,取正; 反之,取负. (4) TOPLOG 4 中的参数 1 和参数 2 分别表示电源的实部和虚部.

4 直接建立网孔方程的算法

设网络具有 l 个网孔,则由回路阻抗矩阵和电压源列向量组成的增广回路阻抗矩阵 $[Z]$ 就是一个 $l\times(l+1)$ 阶的矩阵. 同时,在算法中,又设置了一个 $(l\times l)$ 阶的矩阵 $[Z_c]$,用以存放各回路的电容信息.

4.1 *RLC 对 $[Z]$ 的贡献* 设 RLC 元件数为 NB,顺序读取 TOPLOG1.

(1) $I=0$.

(2) $I=I+1$, $I_2=$ TOPLOG1(I, 2), $I_3=$ TOPLOG1(I, 3),

$I_4=$ TOPLOG(I, 4), $I_5=$ TOPLOG1(I, 5).

(3) 当 $I_5=1$ 时,若 $I_2\times I_3\neq 0$, 则 I_4 送 $[Z]$ 的 I_2 行、I_2 列和 I_3 行、I_3 列的实部,$-I_4$ 送 $[Z]$ 的 I_2 行、I_3 列和 I_3 行、I_2 列的实部,转(6); 若 $I_2=0$, 则 I_4 送 I_3 行、I_3 列的实部,转(6);若 $I_3=0$, 则 I_4 送 I_2 行、I_2 列的实部,转(6).

(4) 当 $I_5=2$ 时, $I_{41}=-1/I_4$. 若 $I_2\times I_3\neq 0$, 则 I_{41} 送 $[Z_c]$ 的 I_2 行、I_2 列和 I_3 行、I_3 列,$-I_{41}$ 送 $[Z_c]$ 的 I_2 行、I_3 列和 I_3 行、I_2 列,转(6); 若 $I_2=0$, 则 I_{41} 送 $[Z_c]$ 的 I_3 行、I_3 列,转(6);若 $I_3=0$,则 I_{41} 送$[Z_c]$的 I_2行、I_2 列,转(6).

(5) 当 $I_5=3$ 或 $I_5=4$ 时, 若 $I_2\times I_3\neq 0$, 则 I_4 送 $[Z]$ 的 I_2 行、I_2 列和 I_3 行、I_3 列的虚部, $-I_4$ 送 $[Z]$ 的 I_2 行、I_3 列和 I_3 行、I_2 列的虚部, 转 (6); 若 $I_2=0$, 则 I_4 送 $[Z]$ 的 I_3 行、I_3 列的虚部,转(6); 若 $I_3=0$, 则 I_4 送 $[Z]$ 的 I_2 行、I_2 列的虚部,转(6).

(6) 若 $I<NB$, 则转(2),否则结束.

4.2 *独立电源对 $[Z]$ 的贡献* 设独立电源数为 NI, 顺序读取 TOPLOG4.

(1) $I=0$.

(2) $I=I+1$, $I_2=$ TOPLOG4(I,2), $I_3=$ TOPLOG4(I, 3), $I_4=$ TOPLOG4(I, 4), $I_5=$ TOPLOG4(I,5). 若 $I_2\neq 0$,则$-I_4$、$-I_5$ 分别送 $[Z]$ 的 I_2 行、$(l+1)$ 列的实部和虚部;若 $I_3\neq 0$,则 I_4、I_5 分别送 $[Z]$ 的 I_3 行、$(l+1)$ 列的实部和虚部.

(3) 若 $I < NI$，则转(2)，否则结束。

4.3 受控源对 [Z] 的贡献　设受控源数为 ND，顺序读取 TOPLOG2.

(1) $I = 0$.

(2) $I = I + 1, I_1 = \mathrm{TOPLOG2}(I, 1), I_2 = \mathrm{TOPLOG2}(I, 2), I_3 = \mathrm{TOPLOG2}(I, 3), I_4 = \mathrm{TOPLOG2}(I, 4), I_5 = \mathrm{TOPLOG2}(I, 5), K_2 = \mathrm{TOPLOG1}(I_1, 2), K_3 = \mathrm{TOPLOG1}(I_1, 3), K_4 = \mathrm{TOPLOG1}(I_1, 4), K_5 = \mathrm{TOPLOG1}(I_1, 5)$.

(3) 当 $I_5 = 5$ 时，若 $K_5 = 1$，则转(4)；若 $K_5 = 2$，则转 (5)；若 $K_5 = 3$，则转(6)；若 $K_5 = 4$，则转(7).

(4) $\mathrm{CCDC} = I_4 \times K_4$，转(9).

(5) $K_{41} = -1/K_4$，$\mathrm{CCDC} = I_4 \times K_{41}$. 若 $I_2 \times K_2 \neq 0$，则 CCDC 送 $[Z_c]$ 的 I_2 行、K_2 列；若 $I_2 \times K_3 \neq 0$，则 $-$CCDC 送 $[Z_c]$ 的 I_2 行、K_3 列；若 $I_3 \times K_2 \neq 0$，则 $-$CCDC 送 $[Z_c]$ 的 I_3 行、K_2 列；若 $I_3 \times K_3 \neq 0$，则 CCDC 送 $[Z_c]$ 的 I_3 行、K_3 列，转(10).

(6) $\mathrm{CCDC} = I_4 \times K_4$. 若 $I_2 \times K_2 \neq 0$，则 CCDC 送 $[Z]$ 的 I_2 行、K_2 列的虚部；若 $I_2 \times K_3 \neq 0$，则 $-$CCDC 送 $[Z]$ 的 I_2 行、K_3 列的虚部；若 $I_3 \times K_2 \neq 0$，则 $-$CCDC 送 $[Z]$ 的 I_3行、K_2 列的虚部；若 $I_3 \times K_3 \neq 0$，则 CCDC 送 $[Z]$ 的 I_3 行、K_3 列的虚部，转(10).

(7) 首先，$\mathrm{CCDC} = I_4 \times K_4$，然后在 TOPLOG3 中找到与 I_1 对应的支路号，此支路为受控源的控制支路，且为耦合线圈，将此支路在 TOPLOG 3 中的行送 JI，并且 $NM = \mathrm{TOPLOG3}(JI, 3)$，$NM$为此控制支路耦合的其他线圈数，其互感信息在TOPLOG3 的第 JI 行到 $(JI + NM - 1)$ 行.

(a) 若 $I_2 \times K_2 \neq 0$，则 CCDC 送 $[Z]$ 的 I_2 行、K_2 列的虚部；若 $I_2 \times K_3 \neq 0$，则 $-$CCDC 送 $[Z]$ 的 I_2 行、K_3 列的虚部；若 $I_3 \times K_2 \neq 0$，则 $-$CCDC 送 $[Z]$ 的 I_3 行、K_2 列的虚部；若 $I_3 \times K_3 \neq 0$，则 CCDC 送 $[Z]$ 的 I_3 行、K_3 列的虚部.

(b) $J = JI$.

(c) $J_4 = \mathrm{TOPLOG3}(J, 4), J_5 = \mathrm{TOPLOG3}(J, 5), JJ_2 = \mathrm{TOPLOG1}(J_4, 2), JJ_3 = \mathrm{TOPLOG1}(J_4, 3), \mathrm{CCDC} = I_4 \times J_5$.

(d) 若 $I_2 \times JJ_2 \neq 0$，则 CCDC 送 $[Z]$ 的 I_2 行、JJ_2 列的虚部；若 $I_2 \times JJ_3 \neq 0$，则 $-$CCDC 送 $[Z]$ 的 I_2 行、JJ_3 列的虚部；若 $I_3 \times JJ_2 \neq 0$，则$-$CCDC 送$[Z]$ 的 I_3 行、JJ_2 列的虚部；若 $I_3 \times JJ_3 \neq 0$，则 CCDC 送 $[Z]$ 的 I_3 行、JJ_3 列的虚部.

(e) $J = J + 1$，转 (c)，直到 $J = JI + NM$ 为止，转(10).

(8) 当 $I_5 = 6$ 时，$\mathrm{CCDC} = I_4$，转(9).

(9) 若 $I_2 \times K_2 \neq 0$，则 CCDC 送 $[Z]$ 的 I_2 行、K_2 列的实部；若 $I_2 \times K_3 \neq 0$，则$-$CCDC 送 $[Z]$ 的 I_2 行、K_3 列的实部；若 $I_3 \times K_2 \neq 0$，则 $-$CCDC 送$[Z]$ 的 I_3 行、K_2 列的实部；若 $I_3 \times K_3 \neq 0$，则 CCDC 送 $[Z]$ 的 I_3 行、K_3 列的实部，转(10).

(10) 若 $I < ND$，则转(2)，否则结束.

4.4 互感对 [Z] 的贡献 设网络有 MC 对互感，顺序读取 TOPLOG3。

(1) $I=0$, $MC1=2MC$。

(2) $I=I+1$, $I_2=$ TOPLOG3(I, 2), $I_4=$ TOPLOG3 (I, 4), $I_5=$ TOPLOG3 (I,5), $K_2=$ TOPLOG1(I_2,2), $K_3=$ TOPLOG1(I_2, 3), $J_2=$ TOPLOG1(I_4, 2), $J_3=$ TOPLOG1(I_4,3)。

(3) 若 $K_2\times J_2\neq 0$, 则 I_5 送 [Z] 的 K_2 行、J_2 列的虚部；若 $K_2\times J_3\neq 0$, 则 $-I_5$ 送 [Z] 的 K_2 行、J_3 列的虚部；若 $K_3\times J_2\neq 0$, 则 $-I_5$ 送 [Z] 的 K_3 行、J_2 列的虚部；若 $K_3\times J_3\neq 0$, 则 I_5 送 [Z] 的 K_3 行、J_3 列的虚部。

(4) 若 $I<MC1$, 则转(2)，否则结束。

4.5 网孔方程的建立

(1) [Z] 的 $1\sim l$ 列元素的虚部乘以角频率 ω。

(2) [Z_c] 的元素除以角频率 ω，然后送入 [Z] 的对应位置，即最后得到了由回路阻抗和等效电压源组成的增广阻抗矩阵。

参考文献

[1] 叶金官编. 电路的计算机辅助分析. 北京：高等教育出版社，1984，第一章.
[2] Desoer C A, Kuh E S. Basic Circuit Theory. New York: McGraw-Hill Book Co., 1969, Chapter 10.
[3] 雷海亮. 电子科学学刊，1991，13(4)：365—371.

DIRECT ALGORITHM FOR FORMING MESH EQUATIONS OF THE ACTIVE MULTI-WINDING COUPLED NETWORK

Lei Hailiang
(*Shandong Polytechnic University, Jinan* 250014)

Abstract The topological expressions of the circuit elements with meshs are put forward. Then, direct algorithm of mesh equations of the active multi-winding coupled network, which is planar, is formulated. The number of the network equations equals the mesh number of the network. It is less than the equations of the modified nodal approach. The procedure of forming equations of this algorithm is simpler than that of the current nodal and the loop approach.

Key words Active network, Circuit of mutual inductance, Loop analysis, Direct algorithm